

Nobelova nagrada za fiziku za godinu 2000.

Damir Veža,* Zagreb

Švedska Kraljevska akademija znanosti (<http://www.kva.se>) odlučila je dodijeliti Nobelovu nagradu za fiziku za 2000. godinu znanstvenicima čiji je rad bio osnova za razvoj moderne informacijske tehnologije (“...for basic work on information and communication technology...”).

Jedna polovina nagrade pripadala je Jacku St. Clair Kilby (“Texas Instruments”, Dallas, Texas, USA, [1]) za njegov doprinos za pronalazak i razvoj *integriranih krugova*.

Drugu polovinu dijele Žores I. Alferov (Fizičko-tehnički institut imenji “A. F. Ioffe”, Sankt Petersburg, Rusija [2]) i Herbert Kroemer (University of California, Santa Barbara, California, USA [3]) za rad na razvoju *poluvodičkih heterostruktura* koje su osnova suvremenih najbržih mikro- i opto-elektroničkih komponenata.



Jack St. Clair Kilby

Nekoliko riječi o samim istraživačima

Jack St. Clair Kilby studirao je i diplomirao elektroniku i elektrotehniku na University of Illinois i na University of Wisconsin (gdje je i magistrirao). Prvo zaposlenje dobio je 1947. u “Globe Union Inc.” (Centralab Division, Milwaukee) i to na razvoju elektroničkih krugova za elektroničke uređaje široke potrošnje. Kilby se zaposlio u kompaniji “Texas Instruments” (Dallas, Texas) 1958. gdje je i započeo svoj pionirski rad na razvoju tehnologije mikročipova. Kilby posjeduje šezdesetak patenata, a za svoj dugogodišnji izumiteljski i istraživački rad, koji je revolucionirao

suvremenu elektroničku tehnologiju i elektroniku, dobio je mnoga cijenjena međunarodna priznanja.

Žores I. Alferov rođen je u Bjelorusiji 1930. Diplomirao je na Elektrotehničkom institutu u Sankt Petersburgu (tada Lenjingradu) 1952., a 1970. je doktorirao na Institutu “A. F. Ioffe” u Sankt Petersburgu. Alferovljeva istraživanja na poluvodičima protežu se kroz četrdeset godina rada za koji je već dobio mnoga velika priznanja kako u Rusiji, tako i u inozemstvu. On je dugogodišnji direktor Instituta “A. F. Ioffe” i potpredsjednik Ruske akademije znanosti.



Žores I. Alferov

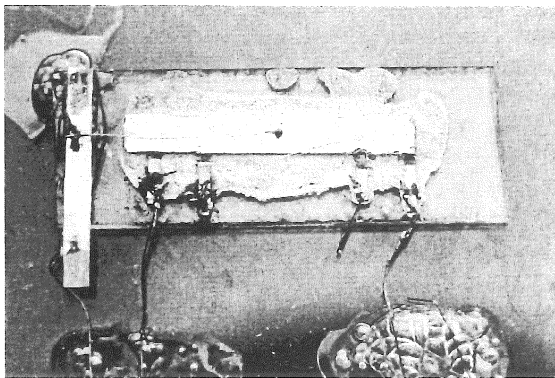


Herbert Kroemer

Herbert Kroemer doktorirao je teorijsku fiziku na Sveučilištu u Göttingenu (SR Njemačka) 1952. godine. Na početku karijere radio je u istraživačkim laboratorijama velikih američkih kompanija RCA i Varian Associates, te na University of Colorado at Boulder. Od 1976. radi na University of California, Santa Barbara. Za svoj rad je već višestruko nagrađivan kako u USA tako i u inozemstvu.

* Autor je izvanredni profesor na Fizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Uže područje interesa mu je laserska spektroskopija i atomska fizika (veza@phy.hr, <http://www.phy.hr>).

Za koja postignuća su nagrađeni?



Slika 1.

Prvi integrirani krug (materijal: germanij, Ge) koji je Jack Kilby napravio daleke 1958. godine. Preuzeto iz [1].

Jack Kilby, koji je nagrađen za pionirski rad na razvoju tehnologije mikročipova u kompaniji "Texas Instruments" (Dallas, Texas) počeo je raditi za ovu kompaniju od 1958. godine. Tijekom ljeta te godine, iako je radio na posuđenoj opremi i improvizirao, Kilby je napravio *prvi integrirani elektronički sklop* u kojem su sve komponente (i aktivne, kao tranzistori, i pasivne kao otpornici ili kondenzatori) bile napravljene na jednoj pločici poluvodiča od desetak kvadratnih centimetara. Uspješna demonstracija tog prvog mikročipa (po današnjim mjerilima — makročipa), 12. rujna 1958. početak je povijesti integriranih krugova. Nakon toga Kilby je rukovodio timovima istraživača koji su napravili prve komercijalne i vojne primjene mikročipova. Pripisuje mu se konstrukcija prvog računala (po narudžbi američke vojske) napravljenog isključivo tom novom tehnologijom. On je praktički izumio i prvo TI ručno (hand-held) računalo i prvi termalni pisac (vidi sliku 2).



Slika 2.

Prvo ručno (hand-held) računalo firme Texas Instruments. Konstruktor Jack Kilby. Preuzeto iz [1].

Oko toga, tko je tvorac prvog integriranog kruga, godinama su vođene ne samo žestoke rasprave nego i sudski sporovi [4, 5, 6]. Danas se izumiteljima modernih integriranih krugova ravnopravno smatraju i Jack Kilby i Robert Noyce (jedan od osnivača "Intel Corp.", umro 1990.). Kilby je zaista prvi napravio i pokazao kako

radi takav uređaj, korištenjem poluvodiča germanija. Noyce je, međutim, za svoj prvi integrirani krug (pojavio se nešto kasnije nego Kilbyjev) koristio poluvodič silicij i silicijev oksid, ali je zamislio i razvio tehnologiju *fotolitografije* koja je kasnije kao ključna korištena u proizvodnji kompleksnih mikročipova.

Alferov i Kroemer nagrađeni su za rad na poluvodičkim heterostrukturama [7, 8]. Kroemer je objavio prvi (teorijski) rad o heterostruktornom tranzistoru 1957. godine, i u njemu je pokazao da bi uređaji osnovani na heterostrukturama trebali imati mnogo bolje osobine nego "obični" tranzistori. "Heterostruktura" je poluvodička struktura koja sadrži jedan ili više heterospojeva. "Heterospoj" je spoj dva kemijski različita poluvodička materijala (koji imaju energetske procjepe različite širine). Heterostruktorni poluvodiči su ili spojevi, kao galij-arsenid, GaAs, ili slitine kao silicij-germanij, Si-Ge. Mreža atomskih veza koja drži atome heterostruktornog kristala na okupu kontinuirano se proteže i preko područja heterospoja. Međutim, vrsta atoma koji grade kristal skokovito se mijenja u području (hetero)spoja. Od mnoštva kemijskih elemenata i spojeva koji tvore poluvodičke kristale samo nekoliko kombinacija tvore heterospojeve koji imaju tako dobre osobine da se mogu koristiti u poluvodičkim uređajima. To su već spomenuti galij-arsenid (GaAs), pa indij-galij-arsenid ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), indij-fosfid (InP) i aluminij-galij-arsenid ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).

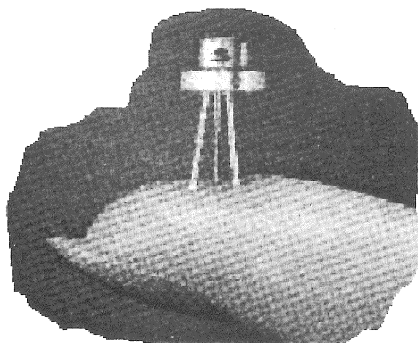
Godine 1963. Alferov i Kroemer nezavisno jedan od drugog došli su na ideju da se na osnovu heterostruktura može napraviti ne samo mikro-elektroničke nego i sasvim nove, opto-elektroničke komponente — poluvodičke lasere. Oni su također izumili i razvili ultra-brze mikro-elektroničke komponente (heterospojne tranzistore) osnovane na poluvodičkim heterostrukturama.

Treba napomenuti da izrada heterospojeva zahtijeva uporabu vrlo skupih i tehnološki vrlo zahtjevnih proizvodnih procesa, kao što su molecular beam epitaxy (MBE) ili metallo-organic chemical vapour deposition (MOCVD). Pri epitaksijalnom rastu kristala svaki novi monomolekularni (monoatomski) sloj kristala raste vrlo sporo i pod vrlo kontroliranim uvjetima. Da bi nastao dobar heterospoj potrebno je koristiti poluvodiče čiji je razmak atoma u rešetki, odnosno konstanta rešetke, gotovo jednaka. Najčešće upotrebljavane kombinacije su Ge-GaAs i GaAs-ZnSe.

Utjecaj integriranih krugova i elektroničkih komponenata na bazi heterostruktura na našu civilizaciju

Pronalazak *integriranog kruga* imao je višestruki utjecaj na razvoj naše civilizacije. Prije svega, mnogi suvremeni elektronički uređaji ne bi ni postojali da nije bilo integriranih krugova. Njihova pojava potakla je nastanak moderne računalne industrije. U kombinaciji s laserskim diodama i tranzistorima na bazi heterostruktura integrirani krugovi revolucionarno mijenjaju suvremene telekomunikacije. Bez integriranih krugova čovječanstvo se ne bi nikada otisnulo u svemir, ljudi ne bi mogli putovati na Mjesec ili slati svemirske brodove u istraživanje planeta Sunčevog sustava.

Najmasovnija primjena tehnologije *heterospojeva* je u proizvodnji poluvodičkih lasera (vidi sliku 3), koji su nezamislivi bez ove tehnologije. Svaki današnji CD-player i CD-ROM uređaj sadrže poluvodičke laserske diode, baš kao i suvremeni svjetlovodni telekomunikacijski uređaji koji služe za prijenos komunikacijskih signala optičkim putem. Laserske diode široko se upotrebljavaju i u čitačima prugastog (bar) koda i laserskim pokazivačima. Korištenjem tehnologije heterostruktura rade se i supersjajne svjetlosne diode (LED — light emitting diode) koje se već upotrebljavaju u automobilskoj industriji kao kočiona svjetla (zamjena za standardne 12 V žarulje) i u prometu za svjetla na semaforima (također kao zamjena za žarulje). Već u bliskoj budućnosti i žarulje koje nam danas služe za rasvjetu stanova mogle bi biti zamijenjene svjetlosnim diodama.

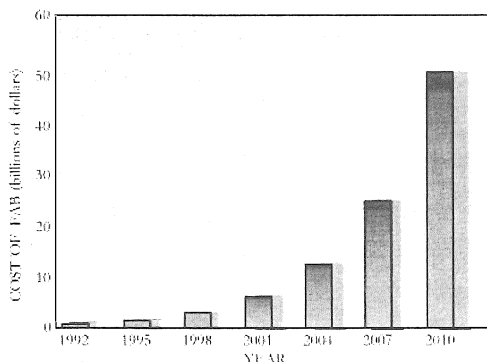


Slika 3.

Laserska dioda — primjer heterostrukturnog poluvodiča

Ultrabrzni tranzistori (HEMT — high electron mobility transistor, MODFET — modulation doped field effect transistor) napravljeni korištenjem tehnologije heterostruktura koriste se u mobilnoj telefoniji i satelitskim komunikacijama (za odašiljanje i primanje radio- i mikro-valnih signala). Većina mobitela ima u svom odašiljaču heterospojne bipolarnе tranzistore (HBT). S druge strane heterospojni tranzistori s efektom polja koriste se za detekciju mikrovalnih signala vrlo malog intenziteta u prijemnicima za satelitske komunikacije. Razvoj heterospojnih tranzistora omogućio je, između ostalog, i smanjenje dimenzija tanjurastih prijemnih antena s 3 m na 0.5 m.

Novi tipovi poluvodiča osnovani na heterostrukturama omogućuju potpuno nove kombinacije mikroelektroničkih, optoelektroničkih i mikrovalnih komponenata i tehnologija. Na primjer, jedan suvremeni ultra-brzi foto-prijamnik sastoji se od heterospojnog detektora fotona i hibridnog pojačala s integriranim krugovima koje koristi ultra-brze komponente osnovane na poluvodičkim heterostrukturama; sve integrirano na istom poluvodičkom čipu.

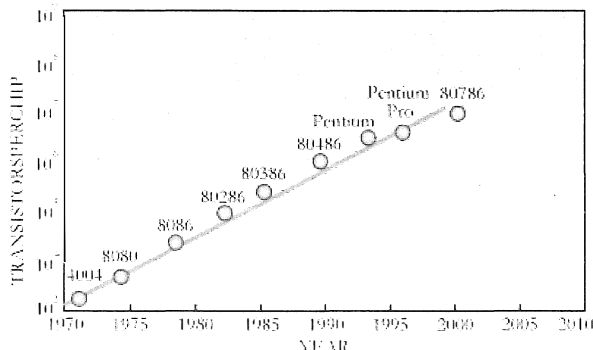


Slika 4.

Grafički prikaz drugog Mooreovog zakona. Vrlo je vjerojatno da se dosadašnji gotovo eksponencijalni trend neće održati u godinama koje dolaze. Preuzeto iz [9].

Da ne bi budućnost opto-elektronike i mikro-elektronike izgledala kao da je bez granica, brine se priroda, ali i ekonomija. Mikrominijaturizacija komponenata i integriranih krugova suočava nas s novim fizikalnim problemima i ograničenjima kako se približavamo atomskim dimenzijama. No ti problemi su ujedno i izazov za istraživače koji ih (najčešće uspješno) rješavaju. Možda će ekonomski moment postati najozbiljnije

ograničenje: cijena proizvodnje enormno raste s daljnjom minijaturizacijom (vidi sliku 4). Gordon Moore ("Intel Corp.") opazio je da se cijena izgradnje pogona za proizvodnju svake nove generacije integriranih krugova povećava za faktor dva svake tri godine (tzv. drugi Mooreov zakon). On predviđa da će cijena izgradnje takvih pogona u godini 2010. biti oko 50 milijardi USD, što je — čak i za visoko razvijene zemlje — tako skupo da mnogi predviđaju "krah" drugog Mooreovog zakona i stabiliziranje cijene na nekoj još uvijek vrlo visokoj razini.



Slika 5.

Grafički prikaz prvog Mooreovog zakona. Broj tranzistora u čipu integriranog kruga povećava se za faktor četiri svake tri godine. Preuzeto iz [9].

Prvi integrirani krugovi bili su vrlo jednostavni, mjereno današnjim standardima. Međutim, brzim razvojem tehnologije, posebno fotolitografije, postalo je moguće postići sve veću gustoću slaganja komponenata u čipu. O tome govori tzv. prvi Mooreov zakon koji je zapravo iskustvena činjenica da se broj tranzistora koje je moguće ugraditi u čip povećava eksponencijalno (slika 5). Približno svake tri godine broj tranzistora koji se ugrađuju u jedan integrirac poraste za faktor četiri. Bit će zanimljivo vidjeti da li će i taj zakon izdržati provjeru već u bliskoj budućnosti.

Napomena. Slike u ovom članku preuzete su iz literature [1-3] i [9].

Literatura

- [1] <http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/jackstclair.shtml>
- [2] <http://www.ioffe.rssi.ru/pti00002.html>
- [3] <http://www.ece.ucsb.edu/Faculty/Kroemer/default.html>
- [4] *The Chip*, T. R. Reid, Simon & Shuster, New York 1984.
- [5] *The genesis of the Integrated Circuit*, M. F. Wolff, IEEE Spectrum, vol. 13, no. 8, August 1976.
- [6] *Invention of the Integrated Circuit*, J. S. Kilby, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-23, July 1976, p. 648.
- [7] *The History and Future of Semiconductor Heterostructures from the Point of View of a Russian Scientist*, Zh. I. Alferov, Physica Scripta, vol. T68, p. 32, 1996.
- [8] *Band Offsets and Chemical Bonding: The Basis for Heterostructure Applications*, H. Kroemer, Physica Scripta, vol. T68, p. 10, 1996.
- [9] *Physics and the Information Revolution* by J. Birnbaum and R. S. Williams, Physics Today, January 2000, p. 38.
- [10] *Materials for Information and Communication* by J. S. Mayo, Scientific American, October 1986.